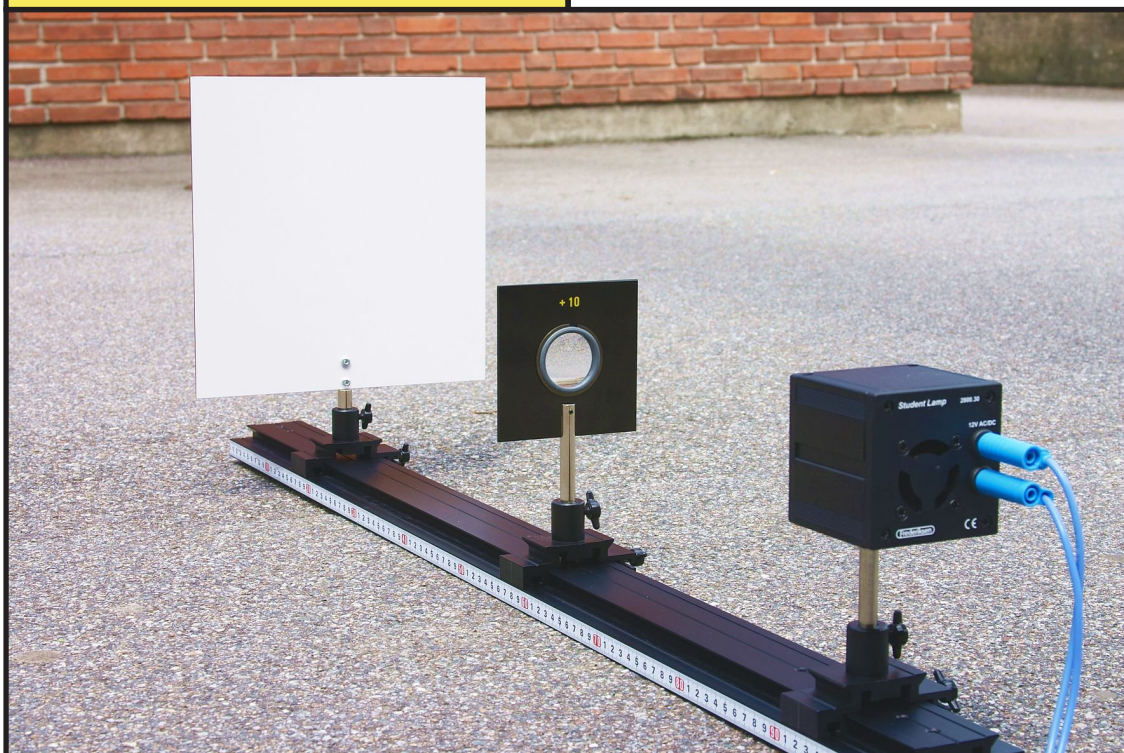
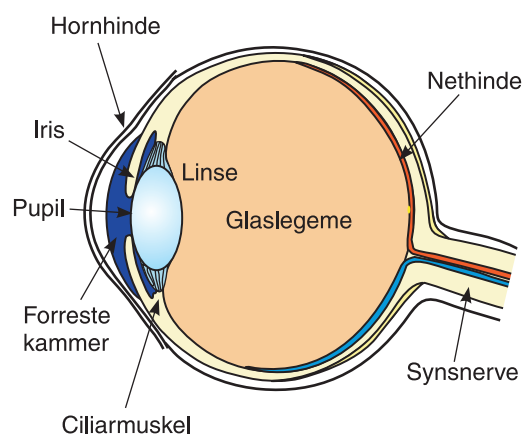


Forsøg & opgaver **LINSE**



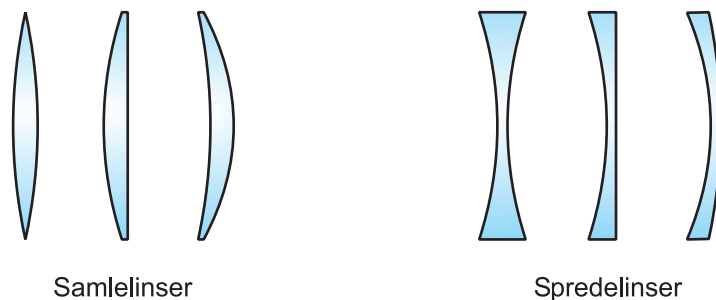
Den geometriske optik

Den såkaldte *geometriske optik* beskæftiger sig med hvordan lys, betragtet som stråler, kan forårsage billeddannelse. I denne teori er begreber som *refleksion* og *afbøjning* centrale. Et vigtigt objekt er *linsen*. En lang række apparater i et moderne samfund indeholder linsen som en essentiel bestanddel. Her kan nævnes briller, luppe, projektorer, kikkerter, mikroskoper, kameraer og teleskoper. Linsen findes endda i en helt naturlig udgave i menneskets øje. I alle tilfælde bruges linsen til at afbøje lys på en hensigtsmæssig måde for at få dannet et billede af et givet objekt. Vi skal studere linsers virkemåde i nogle øvelser og opgaver.

1. Linser

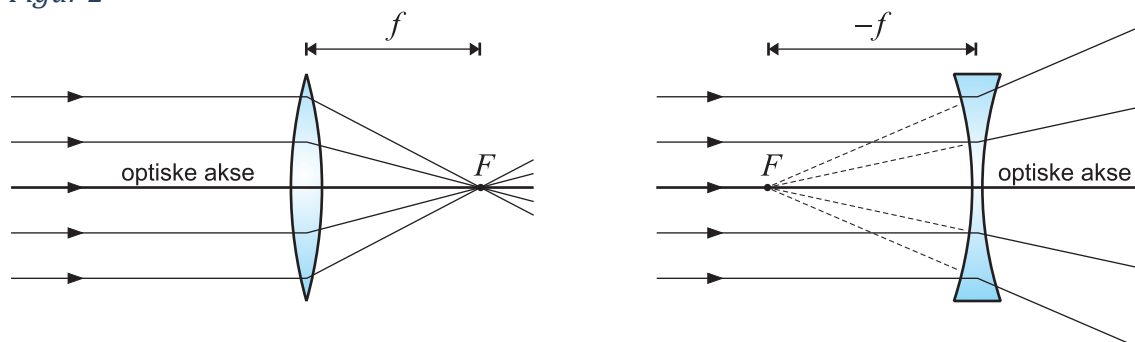
Der er to typer linser: *Samlelinser* og *sprede linser*. De førstnævnte samler lyset, hvori- mod de sidstnævnte spreder lyset. En linse er normalt begrænset af *kugleflader* eller *plane flader*. Samlelinser er tykkest på midten, modsat for sprede linser.

Figur 1



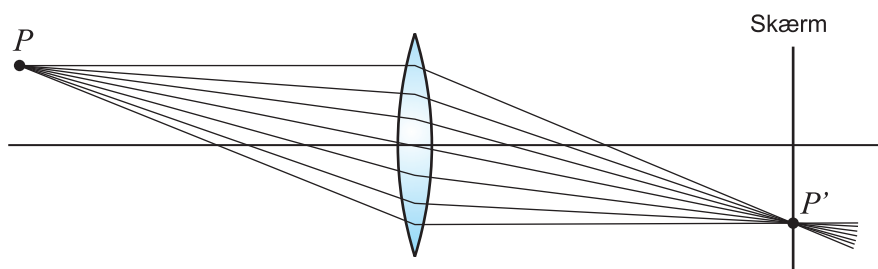
Den *optiske akse* for en linse af ovenstående type er symmetriaksen afbildet på figur 2. Man kan vise, at hvis man sender et bundt af lysstråler, som er parallelle med den optiske akse, ind mod en samlelinse, så vil strålerne efter passage af linsen samles i et punkt, betegnet *brændpunktet* F . Hvis man gør det samme med en sprede linse, vil strålerne spredes. Hvis man derimod tegner strålerne tilbage, ser det ud som om de udgår fra samme punkt. Dette punkt, som ligger på den anden side af linsen, kaldes for sprede linsens brændpunkt. For samlelinsen kaldes afstanden fra linsen til brændpunktet for *brændvidden*. For sprede linsen derimod defineres brændvidden som *minus* afstanden fra linsen til brændpunktet. Vi skal senere se, hvorfor det er smart med disse fortegn!

Figur 2

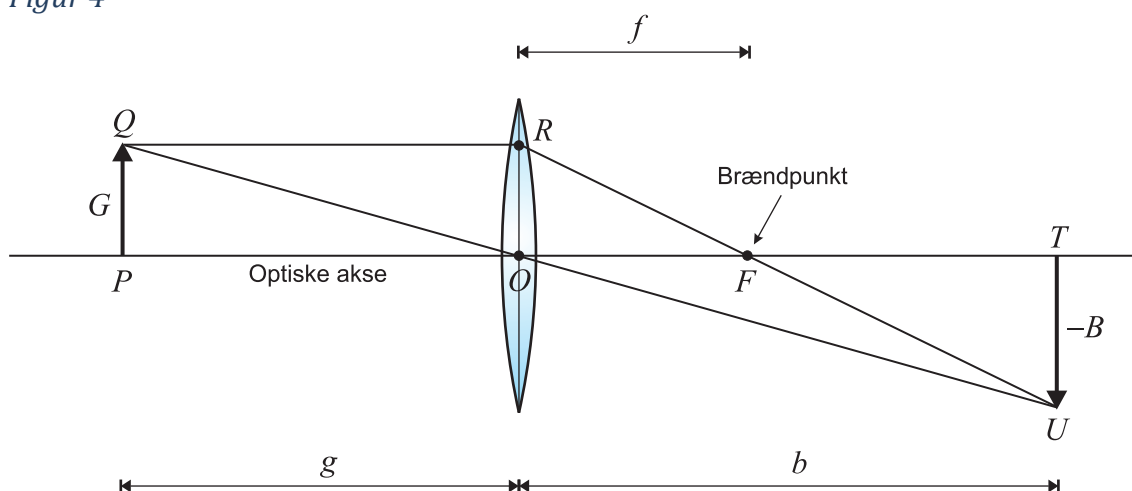


Brændvidden for en linse afhænger i øvrigt af linsematerialets brydningsindeks og af linsens krumning. Idéen med en samlelinse er i princippet, at et *objektpunkt* P skal afbildes i et skarpt *billedpunkt* P' et sted på den anden side af linsen. Objektpunktet tænkes at udsende lysstråler i alle retninger. Det vil være optimalt, hvis alle lysstråler, der rammer linsen, afbøjes, så de passerer igennem samme punkt. I så fald vil man nemlig bare kunne sætte en skærm op, så skærmen går igennem dette punkt, og opleve et skarpt billeddpunkt på skærmen (se figur 3). Hvis skærmen flyttes lidt væk, vil man få et uskarpt billede på skærmen, fordi de forskellige stråler fra objektet ikke vil ramme skærmen i det samme punkt. De ovenfor omtalte linser, begrænsede af kugleformede flader, kaldes også for *sfæriske linser*. Sfæriske linser kan faktisk *ikke* fokusere lysstrålerne i et punkt! Det ligger i selve deres geometri. Det er årsagen til, at man taler om linsefejlen *sfærisk aberration* i forbindelse med kameraobjektiver. Hvis strålerne imidlertid ikke har en for stor vinkel i forhold til den optiske akse, og hvis linsen er det man kalder *tynd*, så vil linsen næsten kunne afbøje lysstrålerne igennem samme punkt. Kræves en linse med bedre optiske egenskaber, må man slibe linsen i andre former, men det er som regel en tidskrævende proces, og dermed en bekostelig affære. Sfæriske linser er derimod nemme at producere, hvilket gør dem billige!

Figur 3



Figur 4



Betragt situationen på figur 4, hvor vi har at gøre med en samlelinse. Når man skal tegne sig frem til billedpunktet U for et givet objektpunkt Q , er det tilstrækkeligt at tegne blot to lysstråler. Den ene lysstråle er den, som forløber parallelt med den optiske akse og efter brydning i linsen fortsætter igennem brændpunktet F . Den anden lysstråle

er den, som passerer igennem lensens midtpunkt. På figur 4 er lysstrålen afbildet som en ret linje QOU . Hvis det skulle afbildes helt korrekt, skulle lysstrålen parallelforskydes en smule ved brydning i linsen, eftersom lyset ifølge brydningsformlen brydes både på lensens for- og bagkant. Er linsen imidlertid tynd, vil denne parallelforskydning være meget lille, og vi ser bort fra den. Førstnævnte lysstråle QRU brydes egentligt også på både lensens for- og bagkant, men igen tilnærmer vi strålegangen ved at tegne den, så det ser ud som om den brydes én gang i punktet R . Efter passage af linsen vil de to lysstråler mødes i billedpunktet U .

Ved at tegne de to lysstråler nævnt ovenfor, kan man ret nemt overbevise sig om, at ethvert punkt på pilen PQ vil have et billedpunkt på pilen TU , og pilen PQ afbildes faktisk i pilen TU . Det interessante er blot, at man vil opleve et billede, som vender på hovedet! Længderne af pilene PQ og TU betegnes henholdsvis G og $-B$. Bemærk, at billedets størrelse B regnes negativt, da det er et omvendt billede. Afstanden fra *genstanden* PQ til linsen kaldes for *genstandsvidden* og betegnes med g . Afstanden fra *billedet* TU til linsen kaldes for *billedvidden* og betegnes med b . Med disse betegnelser kan vi nu formulere *linseformlen*:

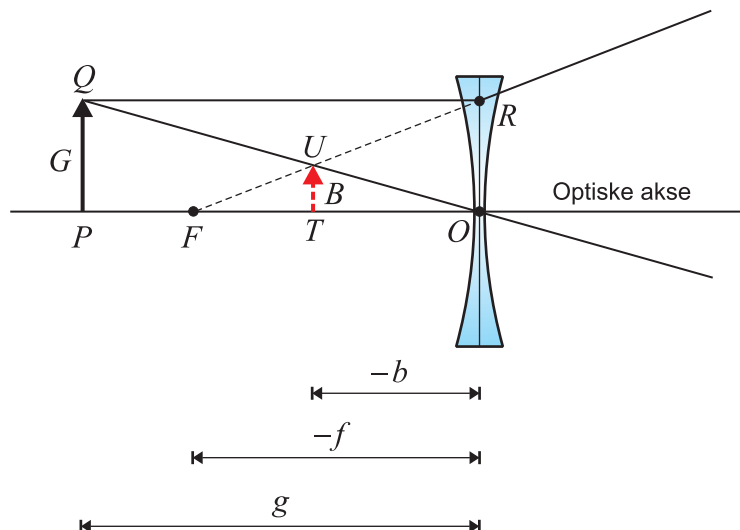
Linseformlen

For en tynd sfærisk linse gælder følgende sammenhæng mellem genstandsvidden g , billedvidden b og brændvidden f :

$$(1) \quad \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Formlen gælder for såvel samlelinser som spredelinser. For spredelinser regnes brændvidden som sagt negativ, det samme gøres med billedvidden b , idet der er tale om et *indbildt billede*. Situationen kan ses på figur 5. Selve udledningen af linseformlen i tilfældet med en samlelinse er udskudt til opgave 1.5.

Figur 5



Forstørrelsesfaktoren

Forstørrelsesfaktoren m defineres som forholdet mellem billedets størrelse B og genstandens størrelse G , hvor man igen vedtager den fortegnskonvention, at billedets størrelse regnes positivt, hvis det er retvendt og negativt, hvis det er et billede, som vender på hovedet. For begge slags linser haves:

$$(2) \quad m = \frac{B}{G} = -\frac{b}{g}$$

For en samlelinse fås således en negativ forstørrelsesfaktor, fordi billedet er omvendt, mens man får et positivt tal for en spredelinse, fordi det indbildte billede er retvendt!

Eksempel 1

En genstand befinder sig 40 cm fra en samlelinse med brændvidde 25 cm. Bestem hvor langt bag linsen, der skabes et skarpt billede, samt forstørrelsesfaktoren.

Løsning: Ifølge linseformlen haves:

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{g} = \frac{1}{25 \text{ cm}} - \frac{1}{40 \text{ cm}} = 0,015 \text{ cm}^{-1} \Leftrightarrow b = 66,7 \text{ cm}$$

og forstørrelsesfaktoren:

$$m = -\frac{b}{g} = -\frac{66,7 \text{ cm}}{40 \text{ cm}} = -1,67$$

□

Optikere beskriver ikke en linse ved dens brændvidde, men ved dens *styrke* D , defineret som den reciprokke værdi af brændvidden:

$$(3) \quad D = \frac{1}{f}$$

Linsestyrken regnes i enheden dioptri = m^{-1} .

~~Man kan vise, at hvis man anbringer to tynde sfæriske linser med brændvidderne f_1 og f_2 tæt ved siden af hinanden, så virker de som én linse med brændvidden f , som tilfredsstiller formelen:~~

$$(4) \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

~~Beskrevet i linsestyrke, vil linsesystemet få en styrke D , givet ved $D = D_1 + D_2$, hvor D_1 og D_2 er linsestyrkerne for de to oprindelige linser.~~

2. Kameraets fysik

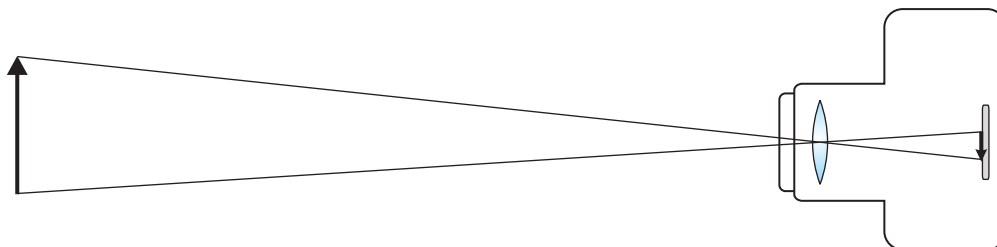
Et af de mest udbredte apparater, hvori man benytter linser, er *kameraet*. Figur 7 nedenfor viser, hvordan et objekt afbildes i et skarpt billede på en skærm. Skærmen er en *film*, hvis der er tale om et gammeldags analogt kamera eller en *billedsensor*, hvis der er tale om et digitalt kamera. Figuren er noget simplificerende, da et *objektiv* i praksis ikke bare består af en enkelt linse, men derimod kan bestå af helt op til 15-20 linseelementer. Grunden til, at et objektiv er en så kompliceret konstruktion er, at man ønsker at kompensere for diverse linsefejl. Hvis der er tale om et zoomobjektiv, så er der særligt mange linseelementer.

Figur 6



Man skelner mellem objektiver med fast brændvidde og zoom-objektiver, der har variabel brændvidde. For et zoom-objektiv kan brændvidden ændres ved at nogle linseelementer bevæges i forhold til hinanden. Når en brændvidde er valgt, skal der stilles skarpt på objektet, dvs. *fokuseres*. Dette sker ved at linsesystemet bevæger sig tættere på eller længere væk fra sensoren. Hvis man tænker på simplificeringen med blot en samlelinse, kan man sige, at det svarer til at billedvidden b indstilles i forhold til genstandsvidden, så linseformlen opfyldes. Det vil give et skarpt billede.

Figur 7



Blændens betydning for dybdeskarpheden

Da billedvidden afhænger af genstandsvidden, indser man umiddelbart et problem: Hvis genstanden har en dybde, dvs. forskellige dele af genstanden ligger i forskellige afstande fra linsen, så kan man ikke samtidigt stille skarpt på alle dele af genstanden! Imidler-

tid kan øjet ikke adskille to punkter, som ligger tilstrækkeligt tæt, da deres billede vil ramme den samme nervespids på øjets bagvæg. Punkter, som har en afstand af højst $\frac{1}{30}$ mm vil ses som ét punkt. Det betyder, at øjet vil se et billede som skarpt, selvom det i princippet ikke helt er det! Indenfor fotolæren taler man om *skarphedsdybde*, som beskriver i hvilken udstrækning billedet er skarpt fra forgrund til baggrund. Ofte ønskes stor dybdeskarphed, men der er også en del situationer, hvor en lav dybdeskarphed kan være med til at forstærke en virkning i billedet. Det kan for eksempel være tilfældet, hvis man tager et udendørs portrætfoto: Ansigtet fremstår skarpt, mens det omkringliggende landskab er uskarpt! Nedenfor har jeg vist det samme med en bil på en parkeringsplads. Der fokuseres på bilen, som dermed er skarp i begge tilfælde. Baggrunden, derimod, er ret skarpt på det første billede, mens det er uskarpt og udtværet på det andet.

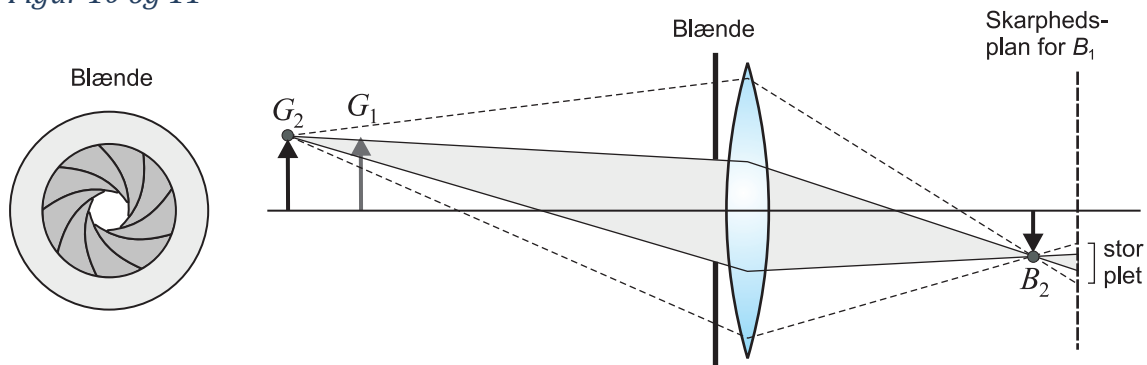
Figur 8 og 9



Skarphedsdybden afhænger af flere faktorer: Dels objektivets brændvidde og dels hvor langt væk genstand og baggrund befinder sig. Der er dog en anden snedig måde, hvorpå man kan regulere skarphedsdybden, og det er ved at anvende en *blænde*. En blænde er egentligt blot en skærm med et hul i, hvor hullets diameter kan reguleres (se figur 10). Blænden i et kamera sidder et sted midt i objektivet, og kan i et moderne digitalt kamera reguleres fra en menu eller nogle drejeknapper på kamerahuset. Billederne på figur 8 og 9 er begge taget fra den samme position og med samme brændvidde. Afstanden til bilen er ca. 2 meter og baggrunden ligger langt borte. Den effektive brændvidde er på 80 mm. Det eneste, som er varieret, er altså blænden. Det første billede er taget med et blændetal på 29, mens der i det andet billede er anvendt et blændetal på 4,5. Et lille blændetal betyder en stor blændeåbning, også kaldet en *stor blænde*, mens et stort blændetal betyder

en lille blændeåbning, også kaldet en *lille blænde*. Mere om blændetal nedenfor. Lad os i det følgende se en forklaring på, hvorfor anvendelsen af en blænde kan gøre dele af et billede skarpere. Betragt figur 11. Genstanden G_1 har et billede B_1 et sted i den plan, der på figuren er betegnet "skarphedsplanen for B_1 " og som vi fra nu af blot vil kalde billedplanen. Man tænker sig nu, at der er en anden genstand G_2 i scenen. Da den har en anden afstand fra linsen end G_1 har, så vil G_2 ikke give et skarpt billede i billedplanen. Et skarpt billede vil derimod dannes lidt foran billedplanen, som figuren viser. Betragt det øverste punkt på G_2 . Hvis der ingen blænde er, vil dette punkt afbildes i en stor udtværet plet i billedplanen, som det ses ved at følge de stiplede linjer og deres skæring med billedplanen. Hvis derimod der anbringes en blænde foran linsen, vil punktet afbildes i en noget mindre plet i billedplanen. Det endelige billede vil altså fremstå noget mere uskarpt uden blænde end med blænde. Hvis den lille plet ikke har en større udstrækning end $\frac{1}{30}$ mm, vil øjet endda opfatte den lille plet som ét punkt!

Figur 10 og 11



Blændetallet eller f -tallet er defineret som

$$(5) \quad \frac{\text{Brændvidde}}{\text{Blændens diameter}} = \frac{f}{D}$$

Arealet af blænden er altså $\frac{1}{4}\pi D^2$, nemlig arealet af en cirkel med diameter D . Hvis man øger blændens diameter med en faktor $\sqrt{2}$, så vil arealet af blændeåbningen altså fordobles, hvorved kameraet tager dobbelt så meget lys ind på den samme tid.

Eksposering og lukketid

Sensoren/filmen skal have en bestemt mængde lys, for at det endelige billedresultat bliver optimalt. En lysmåler i kameraet sørger for, at *eksponeringen* bliver korrekt, hvis man da ikke har valgt en manuel indstilling! Et nyt begreb i den forbindelse er *lukketiden*. Den angiver, hvor lang tid, sensoren modtager lysinformation. Et kamera kan typisk have lukketider fra $1/4000$ sekund til flere sekunder, ja nogle kameraer kan endda indstilles til uendelig. Det er indlysende, at anvendelse af et stort blændetal (lille blænde) vil betyde, at sensoren/filmen ikke modtager så meget lys, som den ville have modtaget med et lille blændetal. Derfor skal kameraet stå åbent i længere tid, for at eksponeringen bliver korrekt. Lukketiden skal altså være større, hvis blændetallet er stort. Og

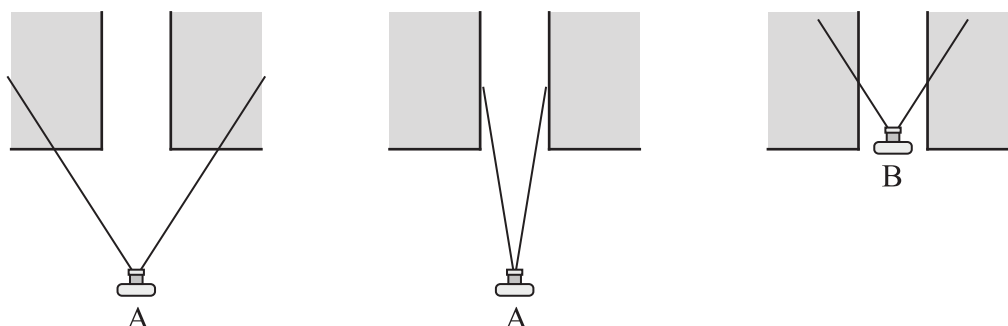
omvendt, hvis man anvender et lille blændetal (stor blænde), kan man nøjes med en kortere lukketid. De to størrelser er altså koblete i en vis forstand! Med små lukketider kan man typisk sagtens håndholde kameraet, uden at billederne bliver rystede – dette afhænger dog også af den anvendte brændvidde. Er lukketiderne ret store, er man nødsaget til at bruge et stativ eller anden støtte for at undgå rystelser. Dyre objektiver har ofte mulighed for ekstra store blænder (små blændetal), dvs. de kan tage mere lys ind. Fordelen ved dette er, at man kan anvende mindre lukketid og dermed bedre kunne tage billeder i situationer med kun lidt lys.

Brændvidden igen

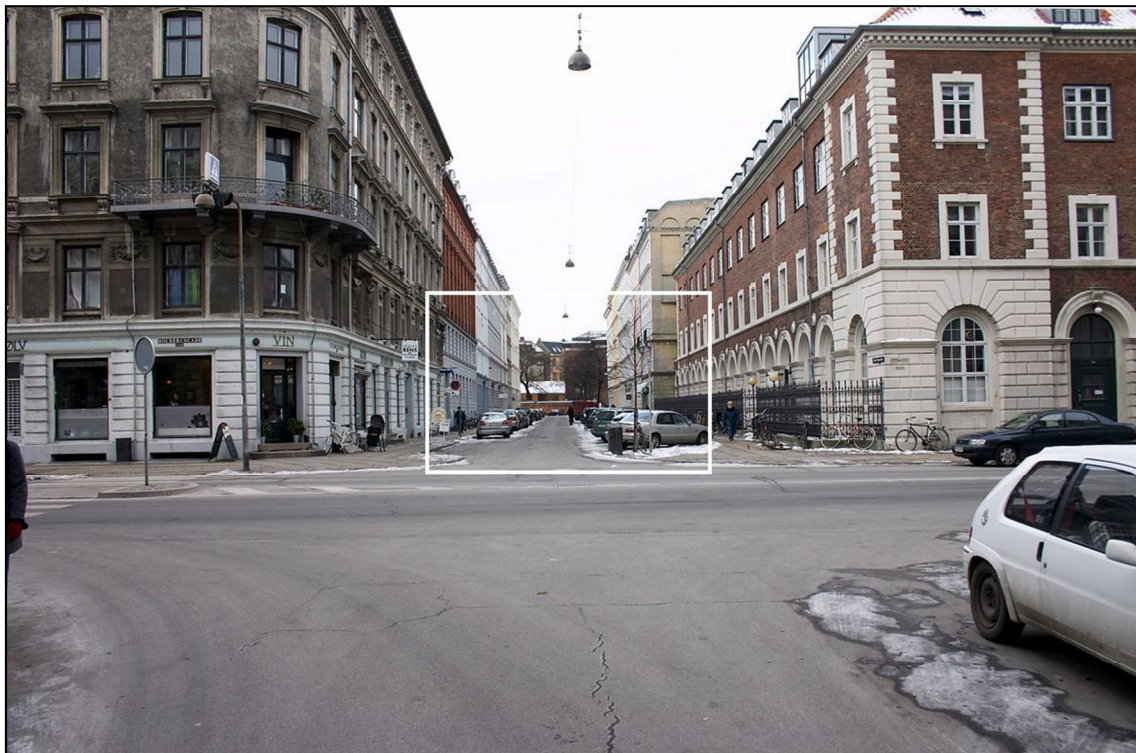
Hvilken betydning har den anvendte brændvidde for det færdige billede? Svaret er, at hvis man anvender en lille brændvidde, så kan kameraet dække en større vinkel af scenen. Dette er årsagen til, at det bliver betegnet som *vidvinkel*, hvis man anvender brændvidder på 28 mm og derunder. Brændvidder på ca. 70 mm og opefter bliver betragtet som *tele*. I sidstnævnte tilfælde gengives kun en ganske lille rumvinkel. Til gengæld bliver det, der gengives, angivet større i det endelige foto. Når man taler om et *zoom-objektiv*, så mener man blot, at det er et objektiv, som giver mulighed for et helt interval af brændvidder, i modsætning til et fast objektiv, som kun tillader én bestemt brændvidde. Et 28-135 mm zoom-objektiv kan således både optage i vidvinkel og i tele.

Lad os kigge på tre billedeksempler, som illustrerer et par pointer. Figurene 13 og 14 viser billeder taget med henholdsvis et vidvinkelobjektiv med brændvidde ca. 28 mm og med et teleobjektiv med brændvidde ca. 110 mm. Begge billeder er taget fra *samme position*, dvs. fra det samme (fjerne) punkt A. Kameraerne er desuden rettet ens. Pointen er her, at billedet taget med teleobjektiv gengiver en mindre del af billedet samtidigt med, at dets dimensioner er forstørret op, så det får samme størrelse som billedet på figur 13. Den del af sceneriet, som er med på telefotoet svarer til den del, som er indenfor den hvide ramme på vidvinkelfotoet. Bemærk, at figur 14 i al væsentlighed blot er en forstørret udgave af det, som er indenfor den hvide ramme på figur 13. Figur 15 er taget med et vidvinkelobjektiv med brændvidde ca. 28 mm fra et nært liggende punkt B. Hvis man sammenligner billederne på figur 14 og 15 kan man tydeligt se den lidt ”flade” virkning telefotoet har, mens vidvinkelfotoet med dens kraftige forkortninger giver fornemmelse af en stor dybde i billedet. Figur 12 viser hvordan billederne er taget.

Figur 12



Figur 13 (Foto taget med vidvinkelobjektiv fra fjernt punkt A)



Figur 14 (Foto taget med teleobjektiv fra fjernt punkt A)



Figur 15 (Foto taget med vidvinkelobjektiv fra nært punkt B)



Blandt fotografer er det velkendt, at billeder taget med *vidvinkelobjektiv* ofte fremstår med stor dybdevirkning på grund af de kraftige forkortninger. Denne effekt gør disse objektiver særligt populære blandt verdens bedste reportage-fotografer, idet det kan give fotoet en dramatisk effekt. Teleobjektiver derimod har den stik modsatte virkning, idet de forekommer at gøre billedet ”fladere”. Vi kender det fra optagelser fra opløbet i et cykelløb: Selvom cyklisterne sprinter som gale, synes de ikke at komme ud af stedet. Genstandene synes at blive ”trængt sammen i dybden”.

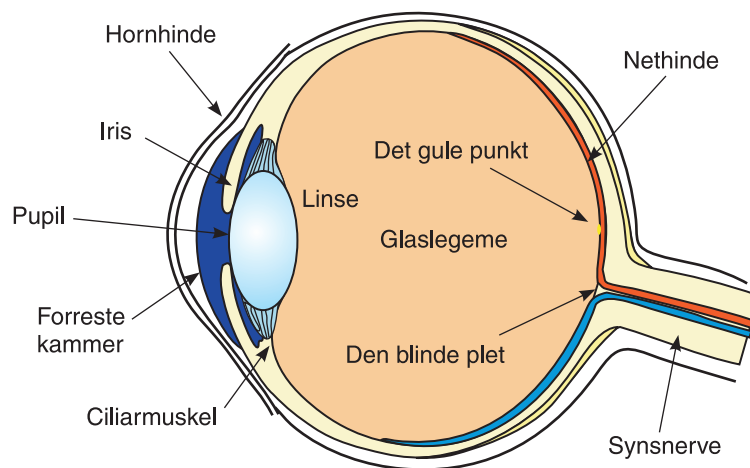
Linsefejl

Som omtalt tidligere er der forskellige linsefejl, som man forsøger at minimere under konstruktionen af objektiver. For sfæriske linseelementer er der den *sfæriske aberration*, som skyldes, at kugleflader ikke er helt optimale: På figur 2 illustrerede vi, at et bundt af stråler, som er parallelle med den optiske akse, ved passage gennem en sfærisk linse, afbøjes igennem det samme punkt, brændpunktet. Dette er lidt af en tilsnigelse. Hvis man skal være helt nøjeregnende, vil de stråler, som rammer linsen længere fra dens optiske akse, afbøjes, så de rammer aksen en smule foran de øvrige stråler. I dag fremstiller man undertiden *asfæriske* linser, hvor denne fejl er kraftigt minimeret. En anden linsefejl er *dispersion*, som hidrører fra, at forskellige bølgelængder, dvs. forskellige farver af lys, afbøjes en smule forskelligt. Det kan medføre skarphedsproblemer eller farvning langs randen. Denne linsefejl kan modvirkes ved at sammensætte linseelementer i objektivet på en smart måde. Der er også andre linsefejl, men dem vil vi ikke omtale her.

3. Det menneskelige øje

Egenskaberne for det menneskelige øje kan på mange måder sammenlignes med principperne i et kamera: I begge tilfælde er der et linsesystem, som skal sørge for, at der dannes et skarpt billede på en slags skærm. Lys passerer igennem hornhinden, og afbøjes både i det forreste kammer og derefter selve linsen, hvorefter der dannes et skarpt billede på nethinden på øjets bagside. Der er tale om et omvendt billede, men heldigvis bearbejder hjernen lysdata, så vi ser et retvendt billede. Da der er en fast afstand fra linsen til nethinden, kan man sige, at billedvidden er fast. For at fokusere er det derfor nødvendigt, at linsen kan ændre sin brændvidde. Dette kan gøres ved at Ciliarmuskler i øjet kan gøre linsen mere eller mindre krum. ~~Her var situationen en smule anderledes for kameraet. Hvis man anvender et zoom-objektiv, starter man typisk med at indstille brændvidden. Herefter skal der fokuseres, og det sker ved at linsesystemet bevæges en smule i forhold til sensoren, dvs. billedvidden ændres lidt. Ligesom et kameraobjektiv, har øjet også en slags blænde, idet pupillen, svarende til blændeåbningen, kan gøres større eller mindre.~~ Det er Iris (regnbuehinden), som afgrænser pupillen. Øjet er omtrent kugleformet: ca. 24 mm langt og 22 mm på tværs. Billeddannelsen på nethinden sker ca. 17-18 mm bag linsen. Det forreste kammer har et brydningsindeks på ca. 1,337. Brydningsindekset for linsen varierer mellem ca. 1,406 og 1,386 fra linsens indre til dens ydre. Da forskellen i brydningsindeks er større mellem luft ($n=1$) og det forreste kammer, end den er mellem det forreste kammer og linsen, foregår den kraftigste brydning af lysets stråler faktisk i det forreste kammer!

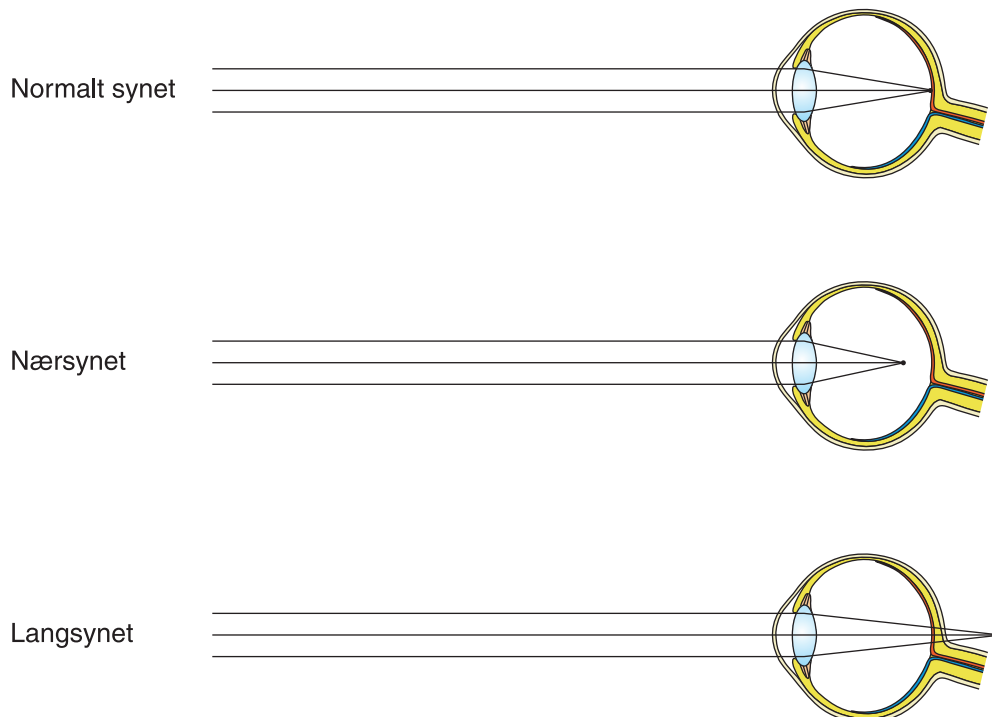
Figur 16



For et normalt øje vil øjets ciliarmuskler være afslappede, når man ser på noget i det uendeligt fjerne. Hvis man kigger på en genstand tættere på, må ciliarmusklerne spændes lidt, så der igen dannes et skarpt billede på nethinden. Man siger, at øjet *akkommoderer*. En del personer er *nærsynede*, og det betyder, at øjet i afslappet tilstand ikke vil danne et skarpt billede på nethinden af en uendeligt fjern genstand. Skarphedsplanen vil ligge foran nethinden. Dette er illustreret på figur 17, hvor man kan antage, at der kommer et bundt af parallelle stråler fra den uendeligt fjerne genstand. For folk, som er langsynede, ligger skarphedsplanen derimod bag øjet. For at korrigere synet hos en nærsynet og en

langsynet person må man anvende en brille/kontaktlinse i form af henholdsvis en spredelinse og en samlelinse. Lad os regne på et par eksempler.

Figur 17



Eksempel 2 (En nærsynet person)

Personer, som er nærsynede, kan se genstande skarpt meget tæt på øjet, mens ting langt borte ses uskarpe. Man taler i den forbindelse om *fjernpunktet*, som er det fjerneste punkt, hvor øjet kan stille skarpt. For et normalt øje vil det være ∞ . For en nærsynet person vil den være endelig. Lad os som et eksempel antage, at den er 3 meter. Idéen er nu at ”bringe” et uendeligt fjernt punkt ind i afstanden 3 meter, hvor det nærsynede øje kan se det skarpt. Det kan gøres med en spredelinse: Når man kigger på den uendeligt fjerne genstand igennem en spredelinse af den rigtige styrke, vil det for øjet se ud som en genstand anbragt i afstanden 3 meter fra øjet. Der er tale om et virtuelt billede, hvorfor billedvidden regnes negativ. Vi kan bruge linseformlen til at beregne den nødvendige brændvidde for spredelinsen:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-3,0 \text{ m}} = -0,333 \text{ m}^{-1} \Leftrightarrow f = -3,0 \text{ m}$$

hvilket svarer til en linsestyrke på $D = 1/f = -0,333$ dioptrier. *Nærpunktet*, som er det nærmeste punkt, man kan se skarpt, vil samtidigt rykke lidt længere væk, men problemet med at se fjerne genstande skarpt er løst! I ovenstående overvejelser har vi set bort fra en mulig afstand mellem øjet og den korrigerende linse, ~~så ovenstående er mest relevant for kontaktlinser. Briller anbringes som oftest i en afstand fra øjet svarende til øjets brændvidde på ca. 17 mm. Det vil nemlig betyde, at der ikke sker nogen forstørrelse, hvilket ville være forfærdeligt, hvis kun det ene øje skulle korrigeres!~~

Eksempel 3 (En langsynet person)

Nærpunktet er som nævnt det nærmeste punkt, som kan ses skarpt. Et normalt øje vil have et nærpunkt i afstanden ca. 25 cm. For Personer, der er langsynede, er dette punkt meget længere væk. Lad os som et eksempel antage, at nærpunktet er i afstanden 1,25 meter. Idéen er nu at ”flytte” en genstand i afstanden 25 cm ud i afstanden 1,25 m, hvor det langsynede øje kan se genstanden skarpt. Dette kan gøres med en samlelinse. Når man kigger på genstanden anbragt i afstanden 25 cm igennem en samlelinse af den rigtige styrke, vil det for øjet se ud som en genstand anbragt i afstanden 1,25 meter fra øjet. Der er tale om et virtuelt billede, hvorfor billedvidden regnes negativ! Vi kan bruge linseformlen til at beregne den nødvendige brændvidde for samlelinsen:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{-1,25 \text{ m}} + \frac{1}{0,25 \text{ m}} = 3,20 \text{ m}^{-1} \Leftrightarrow f = 0,313 \text{ m}$$

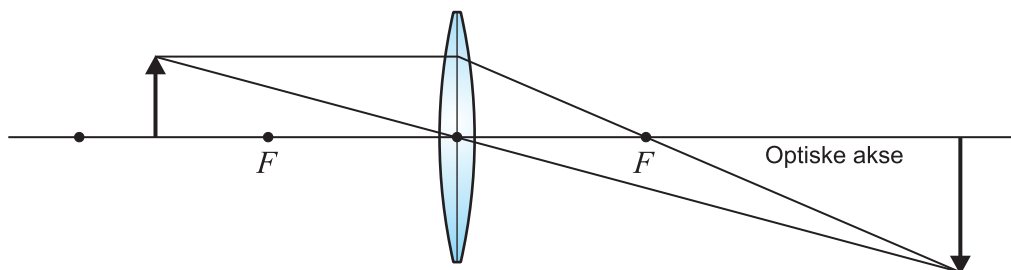
hvilket svarer til en linsestyrke på $D = 1/f = 3,2$ dioptrier. Med alderen flytter nærpunktet længere og længere væk, da øjets evne til at akkommodere reduceres.

I fjerde søjle skal du tage de reciprokke værdier af værdierne i den tredje søjle, og hvis linseformlen er korrekt, skal det give et fast tal, som er lig med linsens brændvidde f . Hvis du får omtrent de samme tal i fjerde søjle, kan du bekræfte linseformlen for denne linse. Bemærk, at den påtrykte brændvidde på 10 cm kun er en grovværdi. Hvilken mere nøjagtig værdi for linsens brændvidde får du?

Gode råd ved udførelsen af forsøget: Følgende valg af genstandsvidder i cm er fornuftige: 12,5 | 13,0 | 13,5 | 14,0 | 14,5 | 15,0 | 16,0 | 17,0 | 18,0 | 20,0 | 25,0 | 30,0. På den optiske bæk er anbragt en meterstok, som det er hensigtsmæssigt at gøre brug af. For at undgå at skulle foretage for indviklede hovedregninger, er det hensigtsmæssigt at placere samlelinsen udfor for eksempel 30 cm, og lade den være her i alle målingerne. Du skal da bare justere lampen og skærmen i de enkelte målinger ... Skærmen justeres, så glødetråden afbildes nogenlunde skarp på denne. Bemærk, at især for store billedvidder kan billedet synes rimelig skarpt over et interval på flere cm. Dette er helt naturligt og hvilken værdi, der så vælges, giver ikke anledning til store afvigelser i den endelige værdi for brændvidden i fjerde søjle!

Forsøg 1.2 (Forstørrelsesfaktorer)

På figuren nedenfor ses en samlelinse med angivelse af de to brændpunkter. En genstandsvidde på det dobbelte af brændvidden er også angivet. I det aktuelle tilfælde er genstanden anbragt, så $f < g < 2 \cdot f$. Vi ser, at der er tale om en reel forstørrelse.



I det følgende skal udstyret fra forsøg 1.1 anvendes. Anvend den samlelinse med brændvidde på ca. 10 cm, som du undersøgte i nævnte forsøg. Det oplyses, at den snoede glødetråd i pinolpæren er ca. 6 mm lang. Mål eventuelt selv efter!

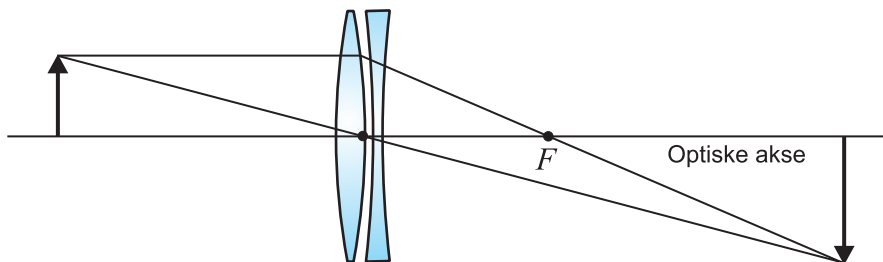
- Undersøg tilfældet $f < g < 2 \cdot f$, dvs. genstanden (pæren) placeres i en afstand af mellem én og to brændvidder fra linsen. Er det virkeligt rigtigt, som forudsagt af figuren, at der er tale om en forstørrelse?
- Undersøg tilfældet $g > 2 \cdot f$, dvs. genstanden (pæren) placeres i en afstand af mere end to brændvidder fra linsen. Giver det en forstørrelse eller en formindskelse? Tegn også en figur af situationen.
- Undersøg tilfældet $g = f$, dvs. genstanden placeres i brændpunktet for linsen. Hvor stort er billedet nu i forhold til genstanden? Lav igen en figur.
- Hvor skal genstanden placeres i forhold til linsen, hvis man ønsker et meget stort billede? Tegn igen en figur.

Forsøg 1.3 (Omvendt billede)

For at se, at billedet, frembragt af en samlelinse, virkeligt vender på hovedet, kan du lade et stearinlys være genstand. Sæt stearinlyset i lysholder 2800.30 fra Frederiksen.

Forsøg 1.4 (Samlelinse og spredelinse sat tæt sammen)

Igen skal du benytte opstillingen med den optiske bæk fra forsøg 1.1. I forsøget skal du bruge en samlelinse med påtrykt brændvidde 5 cm samt en spredelinse med påtrykt brændvidde -20 cm, dvs. produktnumre 2950.30 og 2950.40 fra Frederiksen.



Du skal eksperimentelt bestemme brændvidden for systemet bestående af både samlelinse og spredelinse. Da linserne skal sidde meget tæt sammen, kan du ikke lade dem begge sidde i hver deres rytter. Lad kun samlelinsen sidde i en rytter, og hold så spredelinsen i hånden helt tæt ind til samlelinsen – med samme optiske akse! Lav et skema som i forsøg 1.1 og foretag en række målinger. En række gode værdier for genstandsvidder regnet i cm er: 8,0 | 8,5 | 9,0 | 9,5 | 10,0 | 10,5 | 11,0 | 12,0 | 15,0 | 20,0. Udfyld resten af skemaet og observer, at du omtrent får samme værdier ude i højre kolonne. Det bekræfter, at vi kan betragte linsesystemet som værende ækvivalent med én samlelinse. Giv en god værdi for dens brændvidde.

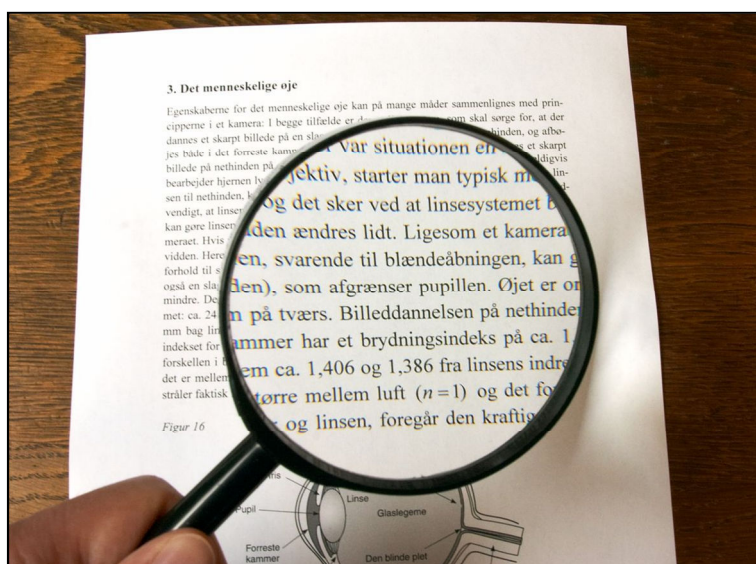
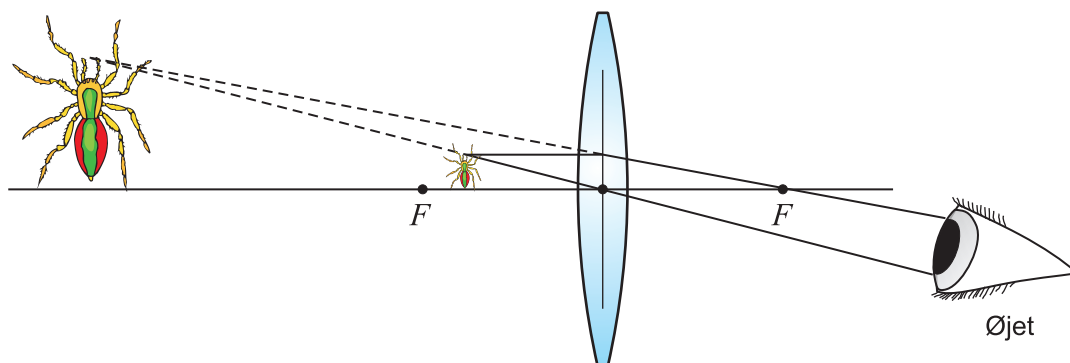
Bestem også en mere nøjagtig værdi for samlelinsens brændvidde. Husk, at den kan afvige lidt fra de påtrykte 5 cm. Slut af med at bruge formel (4) for et linsesystem til indirekte at bestemme en værdi for spredelinsens brændvidde. Hvad får du? Husk igen, at sandheden ikke behøver at være eksakt -20 cm!

Forsøg 1.5 (Alternativ metode til bestemmelse af brændvidde)

Kontroller samlelinsernes påtrykte brændvidde f på følgende måde: Anvend sollys eller en arkitektlampe, som anbringes flere meter fra linsen. Hold linsen op mod lyset og anbring en skærm bag linsen, så der dannes et skarpt billede på denne. Afstanden mellem linse og skærm er lig med brændvidden. Overvej hvorfor? *Hjælp:* Hvorfor kan man antage, at det lys, der rammer linsen, er et *parallel strålebundt*?

Forsøg 1.6 (Principper i en lup)

En *lup* er i virkeligheden blot en samlelinse med en relativ lille brændvidde. Den fungerer på den måde, at personen anbringer samlelinsen i en afstand fra genstanden, som er *mindre end brændvidden* og så der ses et klart billede. Da genstandsvidden således er mindre end brændvidden er der tale om et *indbildt billede*, som kan forklares ved følgende strålegang:



Det er ikke relevant at definere forstørrelsen i en lup som forholdet mellem størrelsen af det indbildte billede og den aktuelle genstand. Det er mere fornuftigt at definere forstørrelsen udfra, hvordan personen med øjet oplever det. Under brug af et optisk instrument er den såkaldte *vinkelforstørrelse* m mere hensigtsmæssig. Den defineres som:

forholdet mellem størrelsen af det billede, som dannes på øjets nethinde under brug af instrumentet, og størrelsen af det billede, der dannes på øjets nethinde, når det uhjulpne øje betragter genstanden i normal afstand.

Som "normal afstand" vælges som regel nærpunktets afstand d , som ofte sættes til 25 cm. Det viser sig, at ovenstående definition blandt andet afhænger af, hvordan luppen placeres i forhold til genstanden. Her vælger man ofte at koncentrere sig om det tilfæl-

de, hvor luppen anbringes i næsten en brændviddes afstand fra genstanden. Det betyder, at det indbildte billede vil dannes i det næsten uendeligt fjerne. En anden fordel er da, at strålerne til øjet så omtrent er parallelle, og øjet derfor ikke behøver at akkommodere! Man kan vise, at vinkelforstørrelsen i det betragtede tilfælde omtrent er givet ved $m \approx d/f$, hvor d er nærpunktets afstand og f er luppens brændvidde. Med standardværdien $d = 25$ cm giver det: $m \approx 25 \text{ cm}/f$.

I praksis benyttes ofte en samlelinse med brændvidde 10 cm. Det vil altså give en forventet vinkelforstørrelse på ca. $m \approx 25 \text{ cm}/f = 25 \text{ cm}/10 \text{ cm} = 2,5$. Man kunne tro, at man kunne få en meget stor forstørrelse ved at vælge en meget lille brændvidde, men her opstår nogle aberrationsproblemer. Man skal også huske på, at luppen gerne skal have et ikke for småt synsfelt, hvilket kræver en stor diameter, hvilket af praktiske årsager sædvanligvis sætter en grænse for lensens krumning. Hvis man skal væsentligt over en vinkelforstørrelse på 3 i praksis, må man fremstille en lup, som består af mindst to linser.

Prøv luppens virkning af i praksis med en samlelinse med brændvidde fx 10 cm. Prøv at vurdere forstørrelsen.

Forsøg 2.1 (Eksperimenter med et digitalt kamera)

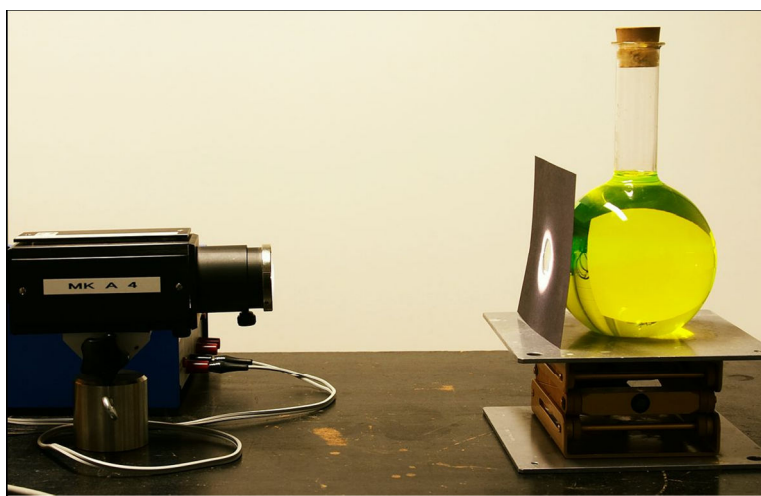
Lån et digitalt kamera fra skolen.

- a) Prøv at eksperimentere med dybdeskarphe­d som på figur 8 og 9. Den normale indstilling for et digitalt kamera er ”programmeret mode”, som dækker over, at kameraet helt af sig selv vælger nogle værdier for blænden og lukketiden. Du skal i stedet bruge *blændeprioritet*, som på mange digital kameraer kan indstilles via en drejeknap ofte, hvor et stort A indgår (A for *Aperture*, åbning). Det er så meningen, at du selv skal vælge nogle værdier for blændetallet, hvorefter kameraet selv vil sørge for en fornuftig lukketid, så billedet bliver rigtigt eksponeret. Det sker ofte via nogle piletaster. Du skal nu tage to billeder på næsten samme måde, eneste forskel skal være, at du skal vælge henholdsvis det mindst mulige blændetal i første billede og det størst mulige blændetal i det andet. Følgende opstilling er fornuftig: Stil dig i en afstand af ca. 2 meter fra en person foran en baggrund, som er mindst 40 meter borte. Baggrunden må meget gerne indeholde noget med nogle klare linjer, fx tekst – træer er ikke optimalt. Brug i begge tilfælde den samme brændvidde på ca. 80 mm. På mange digitalkameraer kan man ikke umiddelbart aflæse den aktuelle brændvidde, så du må gætte dig lidt frem her. På mange kameraer vil det svare til, at du skal zoome ind til lidt over midten i zoom-området! Når du er færdig med at tage billederne skal du tilbage til computeren og studere resultatet i et billedbehandlingsprogram!
- b) Eksperimenter her med brændviddens betydning for et billede, ligesom på figurene 13, 14 og 15. Afprøv de yderste områder af zoom-området og vælg forskellige afstande til genstanden. Hvilke virkninger har vidvinkelbillederne i forhold til billederne taget med tele?

Forsøg 2.2 (Model for brydning af lys i øjet)

Til denne øvelse skal følgende udstyr fra Fredriksen anvendes: Reuterlampe (2800.50), en rundkolbe med flad bund, fx 0095.40, samt en løs samlelinse.

Kolbens runde del fyldes med vand og vandet farves med et gulgrønt farvestof. Reuterlampen indstilles, så et parallelstrålebundt rammer den runde del af kolben ca. midt på. Et stykke pap med et cirkulært hold med en diameter på ca. 2 cm skal fungere som blænde for "øjet", dvs. den runde del af kolben. Ved lysets passage fra luften til det krumme øje sker der en vis brydning. Man ser dog, at den ikke er tilstrækkelig til at give et skarpt billede på "øjets" bagvæg. Hvis man derimod anbringer en samlelinse med passende brændvidde foran kolben men bag blænden, så kan parallelstrålebundtet fokuseres på "nethinden", dvs. kolbens bagside. Linsen gør det ud for øjets linse!



Forsøg 3.1 (Øjemodel af plastik)

En plastik model af øjet, varenr. 7700.10 fra Frederiksen viser de vigtige bestanddele i øjet og deres funktion. Modellen er i 5x størrelse og har 6 dele. Studer det!



Opgaver

Opgave 1.1

En samlelinse har brændvidde 25 cm.

- Bestem billedvidden, hvis genstandsvidden er 1,40 m. Hvad bliver forstørrelsesfaktoren i dette tilfælde?
- Hvor langt foran linsen skal en genstand anbringes, for at billedet dannes 26 cm bag linsen? Hvor stor er forstørrelsesfaktoren?

Opgave 1.2

Et genstand, som befinder sig 2,5 meter foran en samlelinse, danner et skarpt billede 80 cm bag linsen. Hvor stor er linsens brændvidde?

Opgave 1.3

En spredelinse har en brændvidde på -30 cm. Bestem billedvidden for det indbildte billede af en genstand, som befinder sig 50 cm foran linsen. Hvor stor er forstørrelsesfaktoren?

Opgave 1.4

Hvad bliver brændvidden af et linsesystem, hvor to tynde samlelinser med brændvidderne 20 cm og 30 cm sættes tæt sammen? Samme spørgsmål for en tynd samlelinse med brændvidde 5 cm og en spredelinse på -20 cm.

Opgave 1.5 (Udledning af linseformlen)

Du skal udlede linseformlen for en tynd linse.

- Betragt samlelinsen på figur 4. Benyt teorien for ensvinklede trekanter til at vise følgende identiteter:

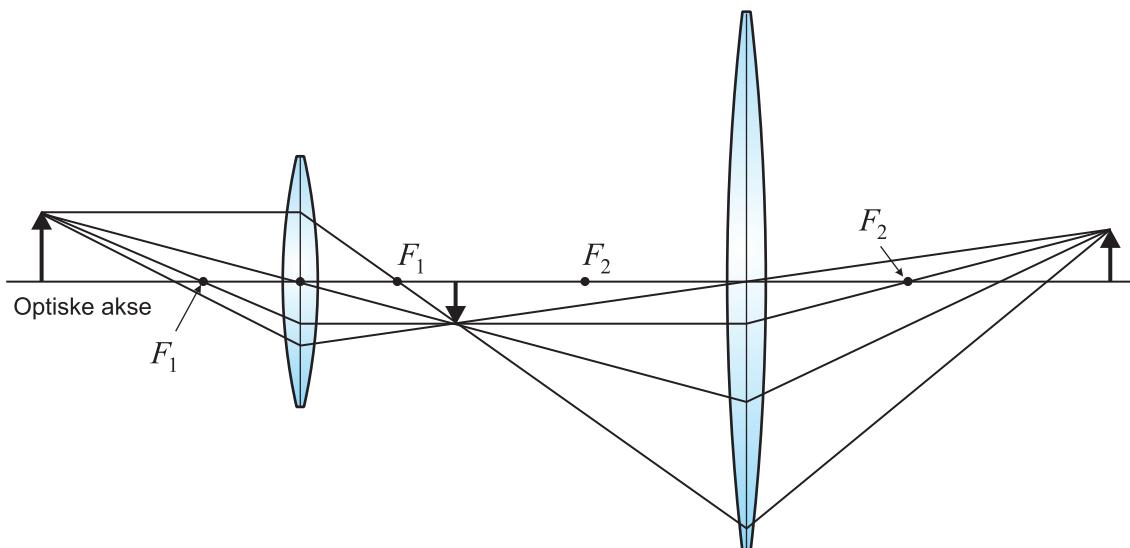
$$\frac{G}{g} = \frac{-B}{b} \quad \text{og} \quad \frac{G}{f} = \frac{-B}{b-f}$$

Kombiner disse to formler til $\frac{f}{g} = \frac{b-f}{b}$ og brug den til at vise linseformlen (1).

- Prøv at bevise linseformlen for spredelinsen på figur 5 på lignende vis som ovenfor.

Opgave 1.6

På opstillingen nedenfor er to tynde linser sammensat med en vis afstand imellem. Linsernes brændvidder er henholdsvis 15 cm og 25 cm. De er anbragt med en indbyrdes afstand på 69 cm, som er mere end summen af brændvidderne. Genstanden er anbragt i afstanden 40 cm fra den første linse. Benyt linseformlen to gange til at bestemme hvor langt bag den sidste linse, der dannes et skarpt billede. Bestem forstørrelsesfaktoren i dette tilfælde. Linsernes respektive brændpunkter er også angivet på figuren.



Bemærkning: Ved konstruktion af kameraobjektiver, er det en helt kunst at kunne sammensætte det på en måde, så objektivet får gode optiske egenskaber. En anden ting: Ved at anvende en spredelinse i et teleobjektiv kan man på snedig vis forkorte objektivet; mere end det skulle forventes ud fra objektivets store brændvidde.

Opgave 2.1

I gamle dage arbejdede man med følgende blændetal: 2 | 2,8 | 4 | 5,6 | 8 | 11 | 16 | 22. Det gør man stadig, men digitale kameraer kan nu også vælge mellemliggende værdier.

- Benyt formelen (5) samt teksten umiddelbart efter til at gøre rede for, at man omtrent fordobler den modtagne lysmængde pr. sek., når man går en værdi til højre i ovenstående serie.
- Antag at eksponeringen i en situation stemmer, hvis man anvender en blænde på 2,8 og en lukketid på $1/500$ sek. Hvis man øger blændetallet til 4, hvor meget skal man så sætte lukketiden til, hvis man ønsker den samme, rigtige eksponering?

Opgave 3.1

Benyt linseformlen til at løse følgende to opgaver:

- En nærsynet person har et nærpunkt i afstanden 2,2 m. Bestem brændvidde og linsestyrke for en spredelinse, som kan flytte nærpunktet ind i en afstand af 30 cm.
- En langsynet person har et fjernpunkt i afstanden 4,7 m. Bestem brændvidde og linsestyrke for en samlelinse, som kan sende fjernpunktet ud i en afstand af 50 m.